

USO DE MATERIALES LIGEROS PARA LA PRODUCCIÓN DE HORMIGÓN DE BAJA DENSIDAD: UNA REVISIÓN LITERARIA¹

USE OF LIGHTWEIGHT MATERIALS FOR THE PRODUCTION OF LOW-DENSITY CONCRETE: A LITERARY REVIEW

Liseth Díaz-Merino

Bachiller de en Ingeniería Civil, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-7339-9898>
dmerinoliseth@crece.uss.edu.pe

Luis Fernando Altamirano-Tocto

Bachiller de en Ingeniería Civil, Estudiante de Ingeniería Civil, Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-9126-8787>
atoctoluisferna@crece.uss.edu.pe

Sócrates Pedro Muñoz-Pérez

Doctor en Gestión Pública y Gobernabilidad, Director de la Escuela de Ingeniería Civil, Profesor- Investigador,
Universidad Señor de Sipán, Chiclayo, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-3182-8735>
msocrates@crece.uss.edu.pe

1 Agradecer a la Universidad Señor de Sipán que nos ha dado las herramientas como acceso a las bases de datos para poder realizar la búsqueda de la literatura usada en el presente manuscrito.

RESUMEN

A lo largo del siglo XX la industria de la construcción viene empleando grandes cantidades de hormigón, en consecuencia, ha aumentado la demanda de los agregados naturales, de manera que se hace necesario contrarrestar el uso de estos. Frente a tal contexto, el presente trabajo tiene como objetivo presentar una revisión literaria del uso de materiales ligeros para producir hormigón de baja densidad, el cual posee aislamiento térmico que se produce principalmente con agregados ligeros. En ese marco, se revisaron 52 artículos indexados entre los años 2017 y 2021 en la base de datos de Scopus. Los resultados revelaron que, empleando ceramsite de lodo como árido, se puede obtener una densidad de 1251 kg/m³ y, con agregados de arcilla expandida, se puede obtener resistencias a la compresión desde 17.7 a 66.1 MPa. En conclusión, se logró determinar que con el uso de materiales livianos en la producción de hormigón se puede disminuir su densidad, además de contribuir en la reducción de daños que se generan al medio ambiente.

Palabras clave:

agregados ligeros, aislamiento térmico, hormigón de baja densidad, residuos.

ABSTRACT

Throughout the 20th century, the construction industry has been using large quantities of concrete. Consequently, the demand for natural aggregates has increased, making it necessary to counteract their use. In this context, this work aims at presenting a literature review of the use of lightweight materials to produce low-density concrete, whose thermal insulation is mainly made using lightweight aggregates. In this framework, 52 articles indexed between 2017 and 2021 in the Scopus database were reviewed. The results revealed that, by employing ceramsite sludge as an aggregate, a density of 1,251 kg/m³ can be obtained and, with expanded clay aggregates, compressive strengths from 17.7 to 66.1 MPa can be obtained. In conclusion, it was determined that the use of lightweight materials in concrete production can reduce its density, in addition to contributing to the reduction of environmental damage.

Keywords:

lightweight aggregates, thermal insulation, low-density concrete, waste.

INTRODUCCIÓN

El hormigón es el material más empleado en la industria de la construcción: solo en el año 2015 se empleó 20 mil millones de toneladas en el mundo. Este material está compuesto por agregados convencionales que se proporcionan entre un 55 y un 88% del volumen total del hormigón y se estima que para el año 2023 su producción aumentará a un total de 48.3 mil millones de toneladas, lo cual puede conducir a una sobreexplotación en las canteras de agregados (Pokorný, Ševčík, Šál y Zárbynická, 2021). El hormigón es utilizado ampliamente en la construcción de estructuras como edificios, puentes y proyectos de conservación de agua (Ojha, Singh y Behera, 2021). Dichas estructuras, una vez cumplido su horizonte de vida son destruidas y desechadas, de manera que generan grandes daños en el ambiente (X. Sun et al., 2021).

El consumo de energía ha atraído una atención considerable por parte de gobiernos, las industrias y la comunidad científica. A partir de la falta de recursos de energías disponibles se han planteado diversas investigaciones sobre materiales que sean eficientes (Jones, Ozlutas y Zheng, 2017). En ese contexto, se han dedicado muchos esfuerzos al estudio de nuevos materiales en la ingeniería que pueden absorber la energía, como el hormigón liviano, lo que representa un gran paso para reducir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero (Palanisamy et al., 2020).

Es por ello que, en países con mayor solvencia económica y tecnológica ligada a la investigación, se viene implementando el uso de áridos ligeros en el hormigón, en búsqueda de un material de construcción que contribuya a cuidar nuestro planeta (Ajey Kumar, Karthik y Mangala Keshava, 2020). Este tipo de tecnología disminuye impactos perjudiciales para el medio ambiente, al tratarse de productos industriales o naturales que se pueden reutilizar en reemplazo de los agregados convencionales, pues desempeñan funciones similares a estos en el hormigón (Kailash y Rashmi, 2018) y, asimismo, generan alternativas de solución ante la escasez de recursos naturales (X. Sun et al., 2021). De esta forma, es posible reciclar materiales de desecho obteniendo agregados ligeros para así fabricar un hormigón que sea amigable con el medio ambiente (Hamidian y Shafgh, 2021).

El hormigón ligero también llamado "hormigón especial de baja densidad", el cual posee aislamiento térmico avanzado, se produce principalmente con áridos ligeros o una matriz celular (Y. Sun et al., 2021). Estos componen cerca del 50% del volumen del hormigón, mientras que el material hecho de una matriz celular, generalmente, se conoce como "hormigón espumado" debido a los poros que le son introducidos por un agente espumante (Chung, Sikora, Stephan y Abd Elrahman, 2020).

El hormigón con áridos ligeros se puede obtener de forma natural o procesando residuos ambientales e industriales. Gracias a las diferentes propiedades útiles del hormigón ligero como material de construcción está siendo cada vez más conocido (Pateriya, Dharavath y Robert, 2021). Dado que aporta baja densidad, reduce las cargas muertas en las construcciones (Al-lami y Al-saadi, 2021), de manera que estos hormigones permiten producir elementos estructurales con menor peso propio, por lo que mejoran la capacidad de carga lo que, a su vez, posibilita su uso en elementos constructivos como muros portantes, puesto que, además, es un material eficaz de aislamiento térmico (Appavuravther, Vandoren y Henriques, 2021). En ese sentido, el uso de hormigón ligero estructural dará lugar a una estructura menos pesada que logra aminorar cualquier fuerza lateral provocada durante un terremoto (Yinh et al., 2021).

En definitiva, el objetivo principal del uso de hormigón ligero es simplificar el diseño de elementos estructurales con el propósito de crear infraestructuras sostenibles. La aplicación de estos en la construcción reduce los costos, facilita el proceso de construcción y tiene la ventaja de ser un material de construcción relativamente "verde" (A. Mohamed, E. Mohamed, Sang-Yeop, Pawel y Dietmar, 2019). Hoy en día existen distintos tipos de hormigones ligeros, según el árido ligero utilizado, tales como, la arcilla expandida, plástico, madera, cerámica, así como los materiales porosos naturales como la piedra pómez, que normalmente se utilizan como agregado en las mezclas de hormigón ligero (Strzałkowski, Sikora, Chung y Elrahman, 2021). En la misma línea, se tiene en cuenta su aplicación tradicional en la industria de la construcción, por ejemplo, en bloques de hormigón ligero prefabricados hechos de agregados de arcilla expandida, los cuales se pueden utilizar en muros de albañilería, así como también en diferentes elementos estructurales, tales como columnas y losas aligeradas (Hücker y Schlaich, 2017).

Concretamente, el propósito de este artículo es exponer la revisión literaria llevada a cabo en torno al uso de materiales ligeros capaces de producir hormigones de baja densidad.

METODOLOGÍA

El presente artículo de revisión se encuentra enmarcado dentro de un proceso experimental con carácter exploratorio, que tiene como objeto de análisis diferentes artículos de revistas especializadas en los estudios relacionados con hormigones de baja densidad y materiales ligeros, los cuales son empleados en la obras de construcción. Así, se procedió a realizar la búsqueda en la base de datos Scopus desde el año 2017 hasta el 2021, utilizando las palabras claves en inglés "*lightweight materials in low-density concrete*", "*materiales ligeros en hormigones de baja densidad*", e incorporando los operadores booleanos "*and*", "*or*" y "*and not*". Con

Base de datos	Año de publicación					Total
	2017	2018	2019	2020	2021	
Scopus	3	1	4	13	31	52
Total	3	1	4	13	31	52

Tabla 1. Distribución de artículos referenciados de acuerdo al año de publicación y base de datos. Fuente: Elaborado por los autores.

Base de datos	Palabras claves con operadores booleanos	Documentos encontrados	Años de búsqueda	Filtros de búsqueda	Documentos encontrados usando los filtros	Documentos seleccionados
Scopus	(Lightweight AND materials) AND (low-density AND concrete)	158	2017-2021	Área: "Engineering"	34	7
				"Material Science"		
				Tipo de documento: articulo		
	(Lightweight AND materials) OR (low-density AND concrete)	33368	2017-2021	Área: "Engineering", "Material Science"	7456	32
				Tipo de documento: articulo		
	(low-density AND concrete) AND NOT (lightweight AND materials)	678	2017-2021	Área: "Engineering"	138	13
"Material Science"						
Tipo de documento: articulo						

Tabla 2. Resumen, criterios, y resultados de búsqueda en la base de datos Scopus. Fuente: Elaborado por los autores.

el operador "and" se encontraron 154 artículos, para luego filtrar según las áreas de "Engineering", "Material Science" y tipo de documento, "article"; proceso del que resultaron 34 artículos, de los cuales se seleccionó 7. Se repitió la maniobra con el operador "or", para encontrar 33. 368 documentos; posteriormente, se filtró según el área y el tipo de documento, obteniéndose 7. 456, de los cuales se seleccionaron 32 artículos. Y, por último, con el operador "and not" se encontraron 678 documentos, que después de filtrar según el área y el tipo de documento, resultaron en 138, de los cuales se escogió 13 artículos. En la Tabla 1, Tabla 2 y Figura 1 se expone esta metodología con mayor detalle.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MATERIALES LIGEROS

El agregado ligero es beneficioso porque disminuye las cargas muertas de una estructura y proporciona curado interno para mitigar el agrietamiento temprano, así como también reduce los efectos de un terremoto (Muralitharan y Ramasamy , 2017). Sin embargo, la dosificación de la mezcla y la manipulación de hormigón de agregado ligero (LWAC) recién mezcladas no son tan sencillas como las del hormigón convencional (J. Kim, Lee y Y. Kim, 2021).

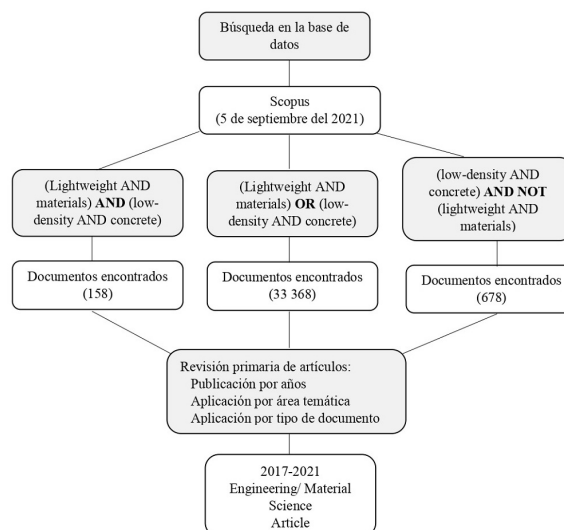


Figura 1. Búsqueda de artículos en la base de datos de Scopus. Fuente: Elaborado por los autores.

La industria de la construcción tiene un gran impacto en el crecimiento económico, pero al mismo tiempo es conocida como uno de los principales consumidores de recursos naturales y energía para la fabricación de materias primas en todo el mundo (Chung, Sikora, Kim, El Madawy y Abd Elrahman, 2021). Así, la concentración en la implementación de desechos y materiales derivados

Tipo de hormigón	Norma (ASTM)	Agregado		Hormigón		
		Tamaños	Densidad (Kg/m ³)	Tipos	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a la compresión (MPa)
Hormigón estructural	C330	*Fino *Grueso *Combinación de agregado fino y Grueso	* >1120 * >880 * >1040	*Escoria de alto horno *Ceniza pulverizada *Arcillas expandidas *Pizarra expandida *Piedra pómez *Escoria *Piedra caliza *Diatomita	1360-1920	17-28

Tabla 3. Resumen de los diferentes tamaños de agregados y tipos de hormigón adicionando materiales ligeros. Fuente: Maghfouri et al. (2021).

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. Ligero de Plástico	Portland Ordinario	75%	18	1900	0.5	(Alqahtani et al., 2021)
A. de Poliestireno expandido	Portland Ordinario	60%	30.53	1716	---	(Wibowo et al., 2021)
A. de Poliestireno expandido	CEM I 52.5N	15%	32	1900	0.39	(Rosca, 2021)

Tabla 4. Resistencia a la compresión de los agregados livianos artificiales. Fuente: Elaborado por los autores.

para sustituir los materiales naturales y manufacturados existentes es cada vez más importante para respaldar el concepto de producto ecológico (Moutassem, 2020).

Para producir hormigón ligero, se han empleado distintos tipos de materiales como áridos ligeros. La exhaustiva investigación de Maghfouri et al. (2021) se abocó a esos diversos tipos de materiales que pueden ser utilizados en el LWAC con una densidad aparentemente sobresaliente.

Existen múltiples investigaciones sobre materiales que se pueden adicionar a un hormigón para que sea de menor densidad (Zade, Bhosale, Dhir, Sarkar y Davis, 2021). Por ello se presenta a continuación una revisión sistemática de varios estudios sobre el comportamiento de los materiales (Alqahtani y Zafar, 2020), tanto materiales naturales, artificiales o desechos empleados en un concreto de agregado ligero (Zeng, Sun, Tang y Zhou, 2020).

AGREGADOS LIVIANOS ARTIFICIALES

Agregado de plásticos

Los hallazgos de Dielemans, Briels, Jaugstetter, Henke y Dörfler (2021) indicaron que el uso de agregados ligeros

de plásticos en estructuras de hormigón conduce a ahorros en cantidades de hormigón y acero de hasta un 7.23% y 7.18%. Además, revelaron que las estructuras de losas con luces de entre 4 y 5 m son las que más se benefician con el uso de este tipo de material.

El análisis de Alqahtani, Abotaleb y ElMenshaway (2021) señala, en tanto, que reemplazando el 75% del volumen de agregados naturales con plástico reciclado y haciendo uso de cemento portland ordinario en una relación agua/cemento a/c de 0.5, el hormigón alcanza una resistencia a la compresión ($f'c$) de 18 MPa y una densidad de 1900 kg / m³.

Agregado de poliestireno expandido

El aglomerante utilizado en la investigación de Wibowo, Lianasari, Wiransya y Kurniawan (2021) fue cemento portland ordinario, con un 60% de agregado de poliestireno expandido en reemplazo parcial del agregado fino en volumen. Se alcanzó aquí una $f'c$ de 30.53 MPa y una densidad de 1716 kg/m³.

Otro estudio realizado por Rosca (2021) reveló que con el uso de cemento CEM I 52.5N, tuvo una relación de a/c de

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. Ligero de tierra de diatomitas	Portland Ordinario	40%	13.45	1290	0.55	(Hasan et al., 2021)
A. Clinker de aceite de palma	CEM I 42.5N	85%	35.56	1933	0.50	(Sarayreh et al., 2020)
A. de almendra de palma y casara de bigaro	Portland Ordinario	20% c/u	15	1900	0.60	(Ogundipe et al., 2021)

Tabla 5. Resistencia a la compresión de los agregados naturales. Fuente: Elaborado por los autores.

0.39 y un reemplazo del 15% del volumen de agregado grueso por agregado de poliestireno expandido. Se obtuvo una $f'c$ de 32 MPa y una densidad de 1900 kg/m³.

Los datos mencionados en párrafos anteriores están resumidos en la Tabla 4, en donde es posible comparar resultados de las investigaciones realizadas por los autores citados líneas arriba.

AGREGADOS LIVIANOS NATURALES

Agregado tierra de diatomeas

Según el estudio realizado por Vinod, Sanjay, Siengchin y Fischer (2021), la tierra de diatomeas tiene una densidad baja, lo que hace que el material sea útil para producir agregados livianos, específicamente, en la producción de hormigón liviano.

En el trabajo llevado a cabo por Hasan, Saidi y Afifuddin (2021) se efectuaron siete mezclas diferentes, de las cuales se observó que una, en particular, presentaba mejores resultados: una densidad de 1290 kg / m³ y una $f'c$ de 13.45 MPa, para una relación a/c de 0.55, reemplazando el 40% de los agregados naturales en peso.

Agregado de clinker de aceite de palma

El hormigón ligero producido mediante la utilización de materiales de desecho tiene la ventaja de proteger el medio ambiente y reducir los costes en la industria de la construcción.

En la investigación realizada por Sarayreh, Othman, Abdullah y Sulaiman (2020) determinó que con la sustitución del 85% del agregado grueso por agregado de Clinker de aceite de palma y con el uso de cemento portland ordinario CEM I 42.5 en la relación a/c de 0.5, se obtiene una $f'c$ de 35.56 MPa a los 28 días y una densidad de 1933 kg/m³.

Por otra parte, Ogundipe, Ogunbayo, Olofinnade, Amusan y Aigbavboa (2021) utilizaron un 20% de almendra de palma y un 20% de cáscaras de bigaro como agregado grueso y un 60% de agregado grueso natural. Su relación a/c fue de 0.60 y el cemento usado

fue portland ordinario. Los resultados experimentales mostraron que su $f'c$ fue de 15.3 MPa y su densidad, de 2040 kg/m³.

En la Tabla 5 se exponen los resultados mencionados por los autores citados en este apartado.

Agregado de arcilla expandida

Sindhuja y Bhuvaneshwari (2021) determinaron que, empleando cemento Portland ordinario, con una relación a/c de 0.45, y con la sustitución de 30% de los agregados gruesos naturales por agregados de arcilla expandida para ser usados en columnas con un tamaño máximo de agregados de 15 mm, la densidad del hormigón ligero resulta de 1990 kg/m³ y la $f'c$, a los 28 días, de 28.3 MPa.

El artículo de Rahul y Santhanam (2020), por su parte, examinó muestras de hormigones elaborados con agregados livianos de arcilla expandida cuyo tamaño máximo fue de 10 mm. El aglutinante utilizado en el estudio consistió en cemento portland, en mezclas con hasta un 30% de sustitución de agregado grueso se logró alcanzar un $f'c$ 25 MPa, siendo su relación a/c de 0.40 y su densidad de 2158 kg/m³ ().

De manera similar, Long (2020) empleó cemento portland tipo I y una relación a/c de 0.40, obteniendo así una $f'c$ de 19.7 MPa a los 28 días, y una densidad de 1489 kg/m³, al reemplazar el 40% de agregados gruesos en volumen por arcilla expandida, cuyo tamaño de agregados fue de 7 mm.

Mientras, Pontes, Bogas, Real y Silva (2021) usaron cemento portland tipo I 42.5 R, con un 15% de arcilla expandida en reemplazo del agregado grueso, y una relación a/c de 0.35; por ende, se obtuvo una $f'c$ de 66.1 MPa y una densidad fue de 1920 Kg/m³.

Bicer (2021) aplicó arcilla expandida en lugar de agregados convencionales para producir material de construcción de baja densidad. Las muestras se secaron durante 28 días a temperatura ambiente y, luego, se realizaron las mediciones. Para la elaboración de las muestras se empleó cemento portland I 42R, se sustituyó

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. arcilla expandida	Portland Ordinario	30%	28.3	1990	0.45	(Sindhuja y Bhuvaneshwari, 2021)
	Portland Ordinario	30%	25	2158	0.4	(Rahul y Santhanam, 2020)
	Portland Tipo I	40%	19.7	1489	0.4	(Long, 2020)
	Portland Tipo I	15%	66.1	1920	0.35	(Pontes et al., 2021)
	Portland Tipo I 42.5 R	10%	24.68	1420	0.5	(Bicer, 2021)
	CEM I 52.5	40%	17.7	1660	0.45	(Moreno-Maroto et al., 2019)

Tabla 6: Resistencia a la compresión de los agregados de arcilla expandida. Fuente: Elaborado por los autores.

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
Piedra Pómez	Portland Ordinario	10%	27.1	---	0.45	(Ramanjaneyulu et al., 2019)
	CEM IV 32,5 R	20%	24	1650	0.5	(Bicer y Celik, 2020)

Tabla 7. Resistencia a la compresión del agregado de piedra pómez. Fuente: Elaborado por los autores.

10% de los agregados naturales por arcilla expandida, y una relación a/c de 0.5. En consecuencia, su f_c fue de 24.68 MPa, la densidad fue 1420 kg/m³ y su coeficiente de conductividad fue 0.215 W / mK. Todas las muestras tenían una tasa de absorción de agua inferior al 30%.

A su vez, Moreno-Maroto, Beaucour, González-Corrochano y Alonso-Azcárate (2019) reemplazaron 40% del agregado grueso por arcilla expandida, empleando un tamaño de 10 mm y cemento Portland CEM I 52.5, para una relación a/c de 0.45, para obtener un f_c de 17.7 MPa y una densidad de 1660 kg/m³.

A continuación, en la Tabla 6 se ofrece un resumen de los resultados mencionados por los autores citados en este apartado.

Agregado de piedra pómez

(Ramanjaneyulu, Seshagiri Rao y Desai, 2019) en su investigación reemplazaron el agregado grueso por piedra pómez, cuyo porcentaje óptimo fue del 10% del agregado de peso normal en fracciones de volumen, con un tamaño máximo de 12 mm. Además, se utilizó cemento portland ordinario y una relación

a/c de 0.45, obteniendo una f_c de 27.1 MPa, y una resistencia a la flexión de 5.06 MPa.

Por el contrario, la proporción óptima de la piedra pómez utilizadas por (Bicer y Celik, 2020) en su estudio fue del 20% del volumen total en reemplazo del agregado grueso natural. Se empleó cemento puzolánico, CEM IV / B (P) 32,5 R, su relación a/c fue de 0.50, siendo su f_c 24 MPa una densidad 1650 kg/m³ y conductividad térmica de 0.45 W/(m.k).

En la tabla 7, contrastamos los resultados mencionados por los autores citados en su investigación.

AGREGADOS DE RESIDUOS RECICLADOS

La utilización de subproductos y materiales de desecho para sustituir los recursos naturales o manufacturados se considera una forma práctica de obtener materiales de construcción ecológicos (Grzeszczyk y Janus, 2020).

Agregados de residuos cerámicos

awoyera, Olalusi y Babagbale (2021) señalaron que, con la sustitución del 100% de la arena por residuos cerámicos y empleando cemento portland ordinario, en una relación cemento/agregado fino de cerámicos pulverizados de

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. Residuos Cerámicos	Portland Ordinario	100%	17.97	2363	---	(Awoyera et al., 2021)
A. Ladrillos triturados	CEM-I 42.5R	10%	31.5	2255	0.6	(Tareq Noaman et al., 2020)
	Portland ordinario	100%	45	1920	0.48	(Yang et al., 2020)
	CEM I 52.5 N	10%	33	1845	0.39	(Atyia et al., 2021)

Tabla 8. Resistencia a la compresión de los agregados de residuos reciclados. Fuente: Elaborado por los autores.

1:3, se obtiene un f_c a los 28 días de 17.97 MPa; valores menores a la mezcla de control realizada en dicha investigación, cuya densidad era de 2363 kg/m³ y su resistencia a la flexión, de 1.26 MPa.

Agregados de ladrillo de arcilla triturada

La utilización de un contenido mínimo de materiales naturales en la producción de hormigón representa la principal preocupación de muchos investigadores. Además de que el hormigón de agregado ligero es deseable por su bajo peso y sus propiedades físicas modificadas (Yao et al., 2021).

Así, Tareq Noaman, Subhi Jameel y Ahmed (2020) utilizaron cemento Portland CEM-I 42.5R, para una relación a/c de 0.6. Con un porcentaje óptimo del 10% de agregado de ladrillo de arcilla triturada como reemplazo parcial de la arena natural, se obtuvo una densidad de 2255 kg/m³, un f_c de 31.5 MPa y una absorción de agua de 7.93%.

En cambio Yang et al. (2020) propusieron el uso de ladrillos triturados como agregado grueso para producir un nuevo hormigón de características livianas. En el proceso se usó cemento portland ordinario con grado 42.5 y una relación a/c de 0.48. Como resultado se consiguió una pérdida en la resistencia a la compresión (f_c) de 12 a 25% y, en la resistencia a la flexión, del 9 al 22%, a los 28 días de curado. La muestra que mejor se comportó fue la que usó 100% de agregado de ladrillo triturados, mostrando un f_c de 45MPa, una resistencia a la flexión de 7.5 MPa y una densidad de 1920 kg/m³.

Los resultados experimentales de Atyia, Mahdy y Elrahman (2021) indicaron que los ladrillos de arcilla triturada se pueden reutilizar como reemplazo de agregados de peso normal para obtener hormigón estructural de agregado liviano, utilizando cemento Portland CEM I 52.5 N y reemplazando el 10% de cemento por agregados de ladrillos de arcilla triturada, con una relación a/c 0.39. De ello resultó un f_c de 33 MPa y una densidad de 1845 kg/m³, con una conductividad térmica de 0.6 W/m.k .

En la Tabla 8 se visualiza un resumen de densidades y resistencias de los agregados reciclados mencionados en los resultados de las investigaciones recién citadas:

OTROS TIPOS DE AGREGADOS

Agregado de ceramsite de pizarra

para la producción de probetas de hormigón liviano G. Zhang et al. (2021), se empleó cemento portland ordinario 42,5 con una relación a/c de 0.47 y una proporción óptima de ceramsite de pizarra de 25% en reemplazo del agregado grueso. De esta forma, al ensayar dichas probetas en el laboratorio, se obtuvo una f_c de 28.1 MPa y una densidad de 1907 kg/m³.

Agregado de caucho granulado

Pongsopha et al. (2021) consideraron cemento Portland Tipo I, agregado de caucho granulado, y el reemplazo del 10% del agregado grueso con una relación a/c 0.35. Se obtuvo aquí una resistencia a la compresión y una densidad de 20.8 MPa y 1904 kg/m³ respectivamente, y una resistencia a la flexión de 4.38 MPa. La conductividad térmica resultó de 0.485 W/m°C.

Agregado de ceramsite de lodo

Esta tecnología reduce los impactos perjudiciales de los desechos sólidos en el medio ambiente y aborda la escasez de recursos naturales. Este estudio tuvo como objetivo desarrollar hormigón verde ligero que incorpore de ceramsite de lodo (J. Zhang, Wang, Ge, Yang y Wei, 2021).

En la misma línea, Xie, Liu, Liu, Wang y Huang (2019) determinaron que al utilizar cemento portland ordinario, con una relación a/c de 0.36, y una sustitución de arena de río por 40% de agregado de ceramsite de lodo en volumen, resulta un f_c a los 28 días de 13.63 MPa y una densidad 1251 kg/m³. Por ello, sostienen que la ceramsite de lodo es un material más respetuoso con el medio ambiente que el hormigón normal para estructuras no portantes.

Tipo de agregado	Tipo de cemento	Porcentaje de agregado	Resistencia a la compresión (MPa)	Densidad (Kg/m ³)	Relación agua/cemento	Referencia
A. ceramsite de pizarra	Portland ordinario	25%	28.1	1907	0.47	(J. Zhang et al., 2021)
A. caucho granulado	Portland Tipo I	10%	20.8	1904	0.35	(Pongsopha et al., 2021)
A. ceramsite de lodo	Portland ordinario	40%	13.63	1251	0.36	(Xie et al., 2019)
A. fibra de acero	Portland P · 52,5	2.25%	63.1	1800	0.23	(Wang et al., 2021)

Tabla 9: Resistencia a la compresión de otros tipos de agregados. Fuente: Elaborado por los autores.

Agregado de fibra de acero

En la investigación de Wang, Liu y Guo (2021) se empleó cemento portland P · 52,5, una relación de a/c de 0,23 y un contenido de fibra de acero 2,25% en reemplazo del agregado grueso. Su $f'c$ a los 28 días fue de 63.1 MPa y su densidad, de 1800 kg/m³.

En la Tabla 9 se aprecia un nuevo resumen de densidades y resistencias de otros agregados previamente citados:

CONCLUSIÓN

En base a las opiniones de los diversos autores en este trabajo revisados y de los resultados de sus investigaciones sobre el uso de materiales ligeros en el hormigón, se ha logrado concluir lo siguiente:

Existen materiales livianos que, al usarlos como agregados en el hormigón, provocan que este último baje su densidad, por lo que pueden ser empleados en la construcción de edificios de gran altura, ya que disminuyen el peso propio de la estructura y, a su vez, mejoran la resistencia a la compresión del hormigón.

El agregado de arcilla expandida evidencia mayor resistencia a la compresión, de 66.1 MPa, en comparación con otros materiales empleados en la elaboración de un hormigón de baja densidad.

El hormigón con menor densidad fue elaborado con agregado de ceramsite de lodo, lográndose una densidad de 1251 kg/m³ y una resistencia a la compresión de 14 MPa, al usar un 40% de agregado de ceramsite de lodo y una relación agua/cemento de 0.36.

La utilización de materiales ligeros en la producción de hormigón constituye una alternativa de solución amigable con el medio ambiente, puesto que permite ampliar la gama de agregados que pueden ser empleados en un hormigón con características similares a los de uno convencional. De esta manera, se

estará contribuyendo a reducir el impacto que puede causar la sobreexplotación de agregados pétreos convencionales y la producción de efecto invernadero, tan perjudiciales para el medio ambiente.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ajey Kumar , V., Karthik , M. y Mangala Keshava. (2020). Production of Recycled Plastic Coarse Aggregates and its Utilization in Concrete. *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, 8(8), 4118 - 4122. DOI: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/14882020>
- Al-lami, M. y Al-saadi, E. (2021). Las relaciones entre la resistencia a la compresión y la densidad del hormigón ligero de poliestireno y sus proporciones de componentes. *Journal of Applied Engineering Science*, 19(1), 175 - 185. DOI: <https://doi.org/10.5937/jaes0-27471>
- Alqahtani, F., Abotaleb, I. y ElMenshawy, M. (2021). Life cycle cost analysis of lightweight green concrete utilizing recycled plastic aggregates. *Journal of Building Engineering*, 40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102670>
- Alqahtani, F. y Zafar, I. (2020). Characterization of processed lightweight aggregate and its effect on physical properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 230. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116992>
- Appavuravther, E., Vandoren, B. y Henriques, J. (2021). Behaviour of screw connections in timber-concrete composites using low strength lightweight concrete. *Construction and Building Materials*, 286. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122973>
- Atyia , M., Mahdy, M. y Elrahman, M. (2021). Production and properties of lightweight concrete incorporating recycled waste crushed clay bricks. *Construction and Building Materials*, 304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124655>
- Awoyera , P., Olalusi, O. y Babagbale, D. (2021). Production of lightweight mortar using recycled waste papers and pulverized ceramics: Mechanical and microscale properties. *Journal of Building Engineering*, 31. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102233>

Bicer, A. (2021). The effect of fly ash and pine tree resin on thermo-mechanical properties of concretes with expanded clay aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00624>

Bicer, A. y Celik, N. (2020). Influence of pine resin on thermo-mechanical properties of pumice-cement composites. *Cement and Concrete Composites*, 112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103668>

Chung, S.Y., Sikora, P., Kim, D., El Madawy, M. y Abd Elrahman, M. (2021). Effect of different expanded aggregates on durability-related characteristics of lightweight aggregate concrete. *Materials Characterization*, 173. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.matchar.2021.110907>

Chung, S.Y., Sikora, P., Stephan, D. y Abd Elrahman, M. (2020). The Effect of Lightweight Concrete Cores on the thermal Performance of Vacuum Insulation Panels. *Materials*, 13(11). DOI:<https://doi.org/10.3390/ma13112632>

Dielemans, G., Briels, D., Jaugstetter, F., Henke, K. y Dörfler, K. (2021). Additive Manufacturing of Thermally Enhanced Lightweight Concrete Wall Elements with Closed Cellular Structures. *Journal of Facade Design and Engineering*, 9(1), 59-72. DOI: <https://doi.org/10.7480/jfde.2021.1.5418>

Grzeszczyk, S. y Janus, G. (2020). Reactive powder concrete with lightweight aggregates. *Construction and Building Materials*, 263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120164>

Hamidian, M. y Shafgh, P. (2021). Post-peak Behaviour of Composite Column Using a Ductile Lightweight Aggregate Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 15(1), 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s40069-020-00453-6>

Hasan, M., Saidi, T. y Afifuddin, M. (2021). Mechanical properties and absorption of lightweight concrete using lightweight aggregate from diatomaceous earth. *Construction and Building Materials*, 277. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122324>

Hücker, A. y Schlaich, M. (2017). On Bending of Infra-Lightweight Concrete Elements – Material Behavior, Bond, Bearing and Deformation Behavior. *Beton- und Stahlbetonbau*, 112, 282–292. DOI: <http://doi.org/10.1002/best.201700008>

Jones, M., Ozlutas, K. y Zheng, L. (2017). High-volume, ultra-low-density fly ash foamed concrete. *Magazine of Concrete Research*, 69, 1146–1156. DOI: <https://doi.org/10.1680/jmacr.17.00063>

Kailash, C. y Rashmi, P. (2018). Investigation into low density fly ash aggregate in microconcrete for lightweight concrete repair. *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 3(10), 1-9. DOI: <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0039-z>

Kim, J., Lee, J. y Kim, Y.H. (2021). Equilibrium of capillary and pore water pressure in lightweight aggregates concrete. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1-7. DOI: <http://doi.org/10.1080/15376494.2021.1949510>

Long, H. (2020). Influence of coarse aggregates and mortar matrix on properties of lightweight aggregate concretes. *International Journal of GEOMATE*, 19(75), 1-7. DOI: <http://doi.org/10.21660/2020.75.45596>

Maghfouri, M., Alimohammadi, V., Azarsa, P., Asadi, I., Doroudi, Y. y Balakrishnan, B. (2021). Impact of Fly Ash on Time-Dependent Properties of Agro-Waste Lightweight Aggregate Concrete. *Journal of Composites Science*, 5(6). DOI: <https://doi.org/10.3390/jcs5060156>

Mohamed, A., Mohamed, E., Sang-Yeop, C., Pawel, S. y Dietmar, S. (2019). Preparation and characterization of ultra-lightweight foamed concrete incorporating lightweight aggregates. *Applied Sciences (Switzerland)*, 9(7). DOI: <http://doi.org/10.3390/app9071447>

Moreno-Maroto, J., Beaucour, A., González-Corrochano, B. y Alonso-Azcárate, J. (2019). Study of the suitability of a new structural concrete manufactured with carbon fiber reinforced lightweight aggregates sintered from wastes. *Materiales de Construcción*, 69(336), e204. DOI: <https://doi.org/10.3989/mc.2019.05719>

Moutassem, F. (2020). Ultra-Lightweight EPS Concrete: Mixing Procedure and Predictive Models for Compressive Strength. *Civil Engineering and Architecture*, 8(5), 963 - 972. DOI: <http://doi.org/10.13189/cea.2020.080523>

Muralitharan, R. y Ramasamy, V. (2017). Development of Lightweight concrete for structural applications. *Journal of Structural Engineering*, 44(4), 336-344. DOI: <http://doi.org/10.1144/136943jm1a691773>

Ogundipe, K., Ogunbayo, B., Olofinnade, O., Amusan, L. y Aigbavboa, C. (2021). Affordable housing issue: Experimental investigation on properties of eco-friendly lightweight concrete produced from incorporating periwinkle and palm kernel shells. *Results in Engineering*, 9. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rineng.2020.100193>

Ojha, P., Singh, B. y Behera, A. (2021). Sintered fly ash lightweight aggregate-its properties and performance in structural concrete. *Indian Concrete Journal*, 95(6), 20-30. DOI: <https://doi.org/10.1258.ojh/211957>

Palanisamy, M., Kolandasamy, P., Awoyera, P., Gobinatha, R., Muthusamy, S., Krishnasamy, T. y Viloría, A. (2020). Permeability properties of lightweight self-consolidating concrete made with coconut shell aggregate. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 3547-3557. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.092>

Pateriya, A., Dharavath, K. y Robert, D. (2021). Enhancing the strength characteristics of No-fine concrete using wastes and nano materials. *Construction and Building Materials*, 276. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.122222>

Pokorny, J., Ševčík, R., Šál, J. y Zárybnická, L. (2021). Lightweight blended building waste in the production of innovative cement-based composites for sustainable construction. *Construction and Building Materials*, 299. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123933>

- Pongsopha, P., Sukontasukkul, P., Maho, B., Intarabut, D., Phoo-ngernkham, T., Hanjitsuwan, S., . . . y Limkatanyu, S. (2021). Sustainable rubberized concrete mixed with surface treated PCM lightweight aggregates subjected to high temperature cycle. *Construction and Building Materials*, 303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124535>
- Pontes, J., Bogas, J., Real, S. y Silva, A. (2021). The Rapid Chloride Migration Test in Assessing the Chloride Penetration Resistance of Normal and Lightweight Concrete. *The Rapid Chloride Migration Test in Assessing the Chloride Penetration Resistance of Normal and Lightweight Concrete*, 11. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11167251>
- Rahul, A. y Santhanam, M. (2020). Evaluating the printability of concretes containing lightweight coarse aggregates. *Cement and Concrete Composites*, 109. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103570>
- Ramanjaneyulu, N., Seshagiri Rao, M. y Desai, V. (2019). Behavior of self compacting concrete partial replacement of coarse aggregate with pumice lightweight aggregate. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6), 434-440. Recuperado de <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v7i6c2/F10790476C219.pdf>
- Rosca, B. (2021). Comparative aspects regarding a novel lightweight concrete of structural grade containing brick aggregate as coarse particles and expanded polystyrene beads. *Materials Today: Proceedings*, 45, 4979-4986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.01.415>
- Sarayreh, A., Othman, M. I., Abdullah, R. y Sulaiman, A. (2020). Experimental investigation on structural lightweight aggregate concrete using palm-oil clinker and expanded perlite aggregates. *Journal of Engineering Science and Technology*, 6, 3741-3756. Recuperado de https://jestec.taylors.edu.my/Vol%2015%20issue%206%20December%202020/15_6_17.pdf
- Sindhuja, S. y Bhuvaneshwari, P. (2021). Push-Out Test on Low-Density Concrete Filled Stiffened Steel Tubular Columns. *International Journal of Civil Engineering*, 19, 1399-1413. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-021-00638-4>
- Strzałkowski, J., Sikora, P., Chung, S.Y. y Elrahman, M. (2021). Thermal performance of building envelopes with structural layers of the same density: Lightweight aggregate concrete versus foamed concrete. *Building and Environment*, 196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.107799>
- Sun, X., Liao, W., Kumar, A., Khayat, K., Tian, Z. y Ma, H. (2021). Multi-level modeling of thermal behavior of phase change material incorporated lightweight aggregate and concrete. *Cement and Concrete Composites*, 122. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104131>
- Sun, Y., Li, J.-s., Chen, Z., Xue, Q., Sun, Q., Zhou, Y., . . . y Poon, C. (2021). Production of lightweight aggregate ceramsite from red mud and municipal solid waste incineration bottom ash: Mechanism and optimization. *Construction and Building Materials*, 287. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122993>
- Tareq Noaman, A., Subhi Jameel, G. y Ahmed, S. (2020). Producing of workable structural lightweight concrete by partial replacement of aggregate with yellow and/or red crushed clay brick (CCB) aggregate. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, 34(4), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksues.2020.04.013>
- Vinod, A., Sanjay, M., Siengchin, S. y Fischer, S. (2021). Fully bio-based agro-waste soy stem fiber reinforced bio-epoxy composites for lightweight structural applications: Influence of surface modification techniques. *Construction and Building Materials*, 303. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124509>
- Wang, J., Liu, F. y Guo, J. (2021). Cyclic tensile behavior of ultra-high performance lightweight concrete. *Journal of Facade Design and Engineering*, 53(4), 170-176. DOI: <https://doi.org/10.11918/202009053>
- Wibowo, A., Lianasari, A., Wiransya, Z. y Kurniawan, T. (2021). The rapid chloride migration test in assessing the chloride penetration resistance of normal and lightweight concrete. *International Journal of GEOMATE*, 21(83), 150-156. DOI: <https://doi.org/10.21660/2021.83.j2146>
- Xie, J., Liu, J., Liu, F., Wang, J. y Huang, P. (2019). Investigation of a new lightweight green concrete containing sludge ceramsite and recycled fine aggregates. *Journal of Cleaner Production*, 235, 1240-1254. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.07.012>
- Yang, J., Shaban, W., Elbaz, K., Thomas, B., Xie, J. y Li, L. (2020). Properties of concrete containing strengthened crushed brick aggregate by pozzolan slurry. *Construction and Building Materials*, 246. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118612>
- Yao, X., Liao, H., Dong, H., Yang, F., Yao, Y. y Wang, W. (2021). Influence of water repellent on the property of solid waste based sulfoaluminate cement paste and its application in lightweight porous concrete. *Construction and Building Materials*, 282. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122731>
- Yinh, S., Hussain, Q., Joyklad, P., Chaimahawan, P., Rattanapitikon, W., Limkatanyu, S. y Pimanmas, A. (2021). Strengthening effect of natural fiber reinforced polymer composites (NFRP) on concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00653>
- Zade, N., Bhosale, A., Dhir, P., Sarkar, P. y Davis, R. (2021). Variability of mechanical properties of cellular lightweight concrete infill and its effect on seismic safety. *Natural Hazards Review*, 22(4). DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)NH.1527-6996.0000501](https://doi.org/10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000501)
- Zeng, Y., Sun, P., Tang, A. y Zhou, X. (2020). Shear performance of lightweight aggregate concrete with and without chopped fiber reinforced. *Construction and Building Materials*, 263. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120187>

Zhang, G., Wang, Y., Ge, J., Yang, J. y Wei, Q. (2021). Effect of Lightweight Aggregate on Workability and Mechanical Properties of Ultra-high Performance Concrete. *Journal of Building Materials*, 24(3), 1-9. DOI: [http://doi.org/10.3969 / j.issn.1007-9629.2021.03.008](http://doi.org/10.3969/j.issn.1007-9629.2021.03.008)

Zhang, J., Zhang, G., Sun, X., Pan, W., Huang, P., Li, Z., ... y Zhou, X. (2021). Analysis of compressive dynamic behaviors of plain concrete and lightweight aggregate concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 15. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00557>